



## تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر همجنس آلومینیوم به مس بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی

جواد جهانگیری<sup>1</sup>، علیرضا فلاحي آرزودار<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران 15875-4413، afallahi@aut.ac.ir

### کلیدواژگان

### چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی  
تحلیل حرارتی  
آلیاژ آلومینیوم H18-1100  
مس خالص C10100

تحقیق حاضر به منظور مطالعه بر روی پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم H18-1100 به مس خالص C10100، انجام گرفت. تأثیر پارامترهای جوشکاری، شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست پین ابزار، بر روی استحکام کششی نمونه‌ها بررسی گردید و به کمک روش طراحی آزمایش رویه سطح پاسخ، بهینه‌سازی شد. به منظور بررسی بیشتر و مطالعه بر روی نتایج حاصل از تست کشش، آزمون‌های متالوگرافی، پراش اشعه ایکس و میکروسختی انجام شدند. ارزیابی میکروساختاری نمونه‌های جوشکاری شده نشان داد که ناحیه اختلاط نمونه‌ها با ترکیب لایه‌هایی از آلومینیوم و مس مشخص می‌شوند. آنالیز پراش اشعه ایکس، نشان‌دهنده پیک‌های کوچکی در دیفرکتوگرام نمونه‌ها است که مربوط به حضور ترکیب‌های بین‌فلزی در این نمونه‌ها می‌باشد. چنین ترکیب‌هایی دارای ساختار ترد و شکننده هستند و با افزایش حرارت ورودی، گسترش می‌یابند. مقادیر بالای میکروسختی در سطح مشترک اتصال مشاهده شد که چنین تغییرات ناگهانی نیز به دلیل حضور ترکیب‌های بین فلزی در ساختار این ناحیه است. همچنین تحلیل حرارتی فرآیند جوشکاری به روش المان محدود انجام شد و دمای تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در مرکز جوش مشخص گردید. با تغییر پارامترهای فرآیند و افزایش حرارت ورودی تا استحکام بهینه، عملیات اختلاط بصورت مناسب‌تری انجام شده و باعث افزایش استحکام کششی می‌شود، با افزایش بیشتر حرارت ورودی درشت دانگی و افزایش ترکیب‌های بین فلزی، باعث کاهش استحکام کششی می‌شوند.

## Effect of friction stir welding process parameters on mechanical properties and microstructure of dissimilar aluminum to copper joint

Javad Jahangiri, Alireza Fallahi Arezoudar\*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, afallahi@aut.ac.ir

### Keywords

Friction Stir Welding  
Thermal Analysis  
AA1100-H18  
C10100

### Abstract

The present research is aimed to study on effect of friction stir welding process parameters on aluminum alloy 1100-H18 to pure copper joints. The effect of welding parameters, including rotational speed, feed rate and pin offset on the tensile strength of samples investigated and were optimized by response surface method. In order to verify the results of tensile tests, metallographic evaluation, microhardness and X-ray diffraction tests were conducted. Microstructural evaluation of the weld samples revealed that the interfacial regions are characterized by mixture layers of aluminum and copper. High Vickers microhardness values were measured at the joint interfaces, which corresponded with the intermetallic compounds. The diffractograms of the X-Ray Diffraction analysis showed small peaks for intermetallics in the welds. Welds produced with low heat input did not have intermetallics formed at the joint interface, whereas welds produced by highest heat input, have the highest content of intermetallics. As well as to determine the maximum temperature in weld nugget, FEM analysis have been conducted and formation temperature of intermetallic components was determined. To evaluate the effect of welding parameters, including rotational, linear speed and tool offset, on weld properties, optimization using Response Surface method is performed and highest tensile strength is achieved. By increasing the rotational speed and tool offset to aluminum side and reducing the linear speed, the generated heat input during welding was increased and this caused to increasing UTS to a maximum and then decreased. By varying the process parameters and increasing the heat input until optimize strength, mixing operations are performed as appropriate and increases the tensile strength, with a further increasing in heat input, grains are being coarse and intermetallic compounds increases and then tensile strength has been decreased.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

J. Jahangiri, A. Fallahi Arezoudar, Effect of friction stir welding process parameters on mechanical properties and microstructure of dissimilar aluminum to copper joint, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 51-63, 2015 (in Persian)

## 1- مقدمه

از سوی دیگر زئو<sup>3</sup> و همکاران [5,4]، آلومینیوم 1060 را به مس خالص تجاری جوش دادند. آن‌ها عیوب بسیاری را در ناحیه اختلاط جوش‌های ایجاد شده با سرعت پایین و در حدود 400 دور بر دقیقه مشاهده کردند؛ درحالی که در سرعت‌های بالا مثل 800 و 1000 دور بر دقیقه، پیوند مناسب متالورژیکی بین تکه‌های مس و ماتریس آلومینیوم ایجاد شد. علاوه بر آن هنگامی که آلومینیوم نرمتر در سمت پیشرونده اتصال قرار داشت، حجم زیادی از عیوب مشاهده شد، آن‌ها این پدیده را به فلز سخت مس نسبت دادند که در حین FSW، به سختی به منطقه پیشرونده منتقل می‌شود.

باتاکو<sup>4</sup> و همکاران [6]، آنالیز تجربی و تئوریک اتصالات FSW غیرمشابه آلیاژ آلومینیوم 5083-H116 به مس خالص را مورد بررسی قرار دادند. عملیات جوشکاری با فرارگیری مس در سمت پیشرونده اتصال و آفست پین به سمت آلیاژ آلومینیوم و تغییر پارامترهای فرایند انجام شد و پروفیل دمایی بدست آمده در حین فرایند با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردید که نشان‌دهنده تطابق قابل قبولی بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بدون در نظر گرفتن آفست ابزار، از لحاظ عملی دستیابی به اتصال مستقیم آلومینیوم به مس امکان‌پذیر نیست، بطوریکه ماکزیمم استحکام کششی برای اتصالات جوشکاری شده 206/7 مگاپاسکال بود که در سرعت دورانی 710 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 69 میلی‌متر بر دقیقه و آفست 0/2 میلی‌متر بدست آمد.

مهتا<sup>5</sup> و همکاران [7]، بر روی تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه آلیاژ آلومینیوم T651-AA6061 به مس، بر روی خواص متالورژیکی و مکانیکی اتصال تحقیق کردند. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده ایجاد جوش بدون عیب بوسیله پین استوانه‌ای بدون رزوه بود، از سوی دیگر جوشکاری با پین رزوه‌دار باعث ایجاد عیوب مختلفی شد. ماکزیمم استحکام کششی بدست آمده 131 مگاپاسکال و ماکزیمم سختی 181 ویکرز (در ناحیه اختلاط) بود که با سرعت دورانی 1500 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه، زاویه انحراف ابزار 2 درجه، آفست پین 2 میلی‌متر و با استفاده از پین استوانه‌ای بدون رزوه بدست آمد. نیروی محوری ایجاد شده وابسته به قطر شانه ابزار و زاویه انحراف آن بود، آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با ثابت نگه

در سال‌های اخیر محققان بر روی توسعه فرایندهایی در زمینه تولید تمرکز کرده‌اند که موجب افزایش کیفیت تولید گردند، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه‌ای از این فرایندهاست. فرایند FSW همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده، یک فرایند پیوسته است. این فرایند شامل نفوذ قسمتی از یک ابزار چرخان در موضع اتصال و حرکت نسبی ابزار و قطعه کار نسبت به هم است. حرکت نسبی بین ابزار و قطعه کار، باعث به وجود آمدن حرارت اصطکاکی می‌شود و پیرامون قسمت نفوذ کرده ابزار یک منطقه پلاستیک را به وجود می‌آورد [1].

در سال‌های گذشته، تحقیق‌های بسیاری روی تکنولوژی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>1</sup> و شکل‌پذیری ورق‌های غیر-متجانس جوشکاری شده از طریق فرایند نامبرده انجام گرفته است. اسماعیلی<sup>2</sup> و همکاران [3]، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه آلیاژ آلومینیوم 1050 به برنج را بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد که در سرعت‌های دورانی پایین، مقادیر ترکیبات اینترمتالیک بسیار ناچیز بود، ولی استفاده کردن از سرعت‌های دورانی بالاتر از 400 دور بر دقیقه، باعث تولید تدریجی تکه‌های اینترمتالیک در ناحیه اختلاط و اینترفیس گردید. CuAl<sub>2</sub> بارزترین ترکیب اینترمتالیک در ساختار کامپوزیتی ناحیه اختلاط بود، در حالیکه ترکیب‌های CuAl<sub>2</sub>، Cu<sub>9</sub>Al<sub>14</sub> و CuZn نیز شناسایی شدند. افزایش سرعت دورانی باعث ضخیم شدن و گسترش ذرات اینترمتالیک اینترفیسی شد. سرعت دورانی بهینه 450 دور بر دقیقه، باعث بوجود آمدن یک ناحیه اینترفیسی با اجزاء اینترفیسی باریک و ساختار لایه‌ای کامپوزیتی در ناحیه اختلاط شد که منجر به افزایش استحکام کششی اتصال گردید.

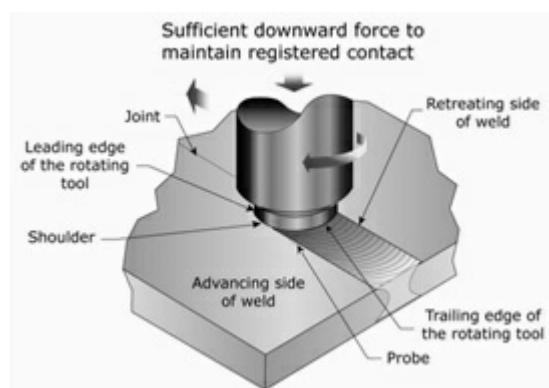


Fig. 1 Schematic of friction stir welding process [2]

شکل 1 شماتیک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [2]

<sup>3</sup> Xue

<sup>4</sup> Batako

<sup>5</sup> Mehta

<sup>1</sup> Friction Stir Welding (FSW)

<sup>2</sup> Esmaeili

به منظور انجام عملیات جوشکاری از ابزار با جنس فولاد گرم کار H13 استفاده شد، شکل 2 نشان دهنده تصویری از ابزار مورد استفاده است. سختی سطحی ابزار پس از عملیات حرارتی نهایی به 51 راکول سی رسید. ارتفاع پین، با توجه به ضخامت ورق، 1/8 میلی متر در نظر گرفته شد و میزان نفوذ پین به منظور انجام جوشکاری برابر 0/1 میلی متر اعمال شد. به منظور عملیات جوشکاری، آلومینیوم در سمت پسرونده اتصال و مس در سمت پیشرونده آن قرار گرفتند. جهت انجام شبیه سازی، ورقها به صورت Solid سه بعدی مدل شده و بر اساس مدل پیشنهادی توسط پراسانا و همکاران [7]، از مدل سازی ابزار خودداری شد؛

جدول 1 آزمایش های طراحی شده به روش سطح پاسخ

Table 1 Designed experiments by response surface

Run	A:Rotation Speed (Rpm)	B:Linear Speed (mm/min)	C:Tool Offset (mm)
1	1395	120	5/0
2	930	80	5/1
3	1395	80	1
4	1860	80	5/1
5	1395	80	1
6	1860	80	5/0
7	1395	120	5/1
8	1860	40	1
9	1395	40	5/0
10	1395	40	5/1
11	930	40	1
12	930	120	1
13	930	80	5/0
14	1860	120	1
15	1395	80	1

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم H18-1100 و مس خالص

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloys

نمونه	تنش تسلیم (Mpa)	استحکام نهایی (Mpa)	ازدیاد طول (%)
18-H1100	125	160	6
C10100	78	208	37

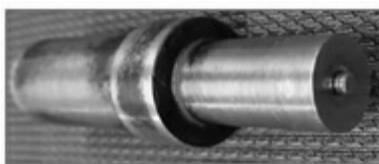


Fig. 2 The measured and simulated temperatures

شکل 2 نمونه ابزار اصطکاکی اغتشاشی

داشتن نیروی محوری بین 6 تا 7 کیلونیوتون می توان اتصال بدون عیبی را بدست آورد.

اتصال مس به آلومینیوم در صنعت غالباً برای کاربردهای الکتریکی استفاده می شود، که از موارد کاربرد آن می توان به صنایع هوافضا و موج برها اشاره کرد. علت تعریف پروژه حاضر در ابتدا ایجاد جوشی سالم بین دو جنس غیرمشابه و سپس بررسی کیفی و کمی اتصال، از دیدگاه خواص مکانیکی و متالورژیکی می باشد. بنابراین با توجه به مشکل های موجود در زمینه جوشکاری آلیاژهای غیرمشابه و کمبود پژوهش های انجام گرفته در این زمینه و به منظور دستیابی به اتصالی با خواص بهینه، به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی جوشکاری غیرمشابه آلیاژ آلومینیوم H18-1100 به آلیاژ مس C10100 پرداخته خواهد شد. با توجه به اینکه کیفیت جوش بدست آمده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به متغیرهای این فرایند وابسته است، طراحی آزمایش به روش متدولوژی سطح پاسخ به منظور دستیابی به پارامترهای بهینه جوشکاری، شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست پین ابزار (به سمت آلومینیوم) و با توجه به نتایج عملی بدست آمده از کارهای تجربی انجام می گردد. همچنین به منظور بررسی تأثیر حرارت ورودی در حین عملیات جوشکاری بر روی نتایج حاصل آزمون آنالیز پراش اشعه X و نحوه توزیع، تحلیل عددی و آنالیز دمایی این فرایند انجام شده و مدلی برای توصیف حرارتی شار گذرا در حین جوشکاری ارائه خواهد شد.

## 2- الگوسازی نظری و تجربی

در این تحقیق به منظور انجام طراحی آزمایشات و رسیدن به نتیجه مطلوب، سعی بر آن شده است تا روند طراحی آزمایشات متدولوژی سطح پاسخ، گام به گام مورد بررسی و به کار گرفته شود. به همین منظور، مهمترین عوامل موثر بر فرایند FSW، از قبیل سرعت دورانی، سرعت خطی و آفست پین ابزار (به سمت آلومینیوم)، مورد بررسی پارامتری قرار گرفتند که بدین ترتیب تعداد 15 آزمایش طراحی شده در جدول 1 قابل مشاهده می باشد.

ورق های مورد استفاده در پروژه حاضر، آلیاژ آلومینیوم AA1100-H18 و مس خالص با ضخامت 2 میلی متر می باشند، که از جمله موارد پر کاربرد در صنعت ایران و جهان نیز هستند. خواص مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده در جدول 2 ارائه شده است.

آزمون XRD بدست آمد. در ادامه الگوهای پراش بدست آمده با فایل‌های استاندارد پراش برای ماده پایه آلومینیوم و مس مقایسه شدند. هرگونه تفاوتی که در این دو دیفرکتوگرام مشاهده شد، مربوط به حضور ترکیب‌های اینترمتالیک در نمونه است. در ادامه و به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر نواحی مختلف جوش (به ویژه منطقه HAZ) و چگونگی تغییر اندازه این نواحی، آزمون ریز سختی بر روی نمونه‌های 8، 12 و نمونه بهینه انجام شد.

### 3- نتایج و بحث بر روی نتایج

#### 3-1- تست کشش

در پژوهش حاضر، از نمونه تست کشش ساب سایز (مطابق با استاندارد ASTM-E8 [8]) استفاده شد، نمونه‌های جوشکاری شده و نمونه‌های تست کشش، به ترتیب در شکل‌های 3 و 4 و نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌ها در جدول 3 مشاهده می‌شوند. پس از انجام آزمایش‌ها و پیش از تخمین تابع ریاضی، لازم است، میزان معنی دار بودن تأثیر متغیرهای کنترلی بر پاسخ خروجی بررسی شود.



Fig. 3 Welding samples with a thickness of 1.8 millimeters

شکل 3 نمونه‌های جوشکاری شده با ضخامت جوش 1/8 میلی‌متر

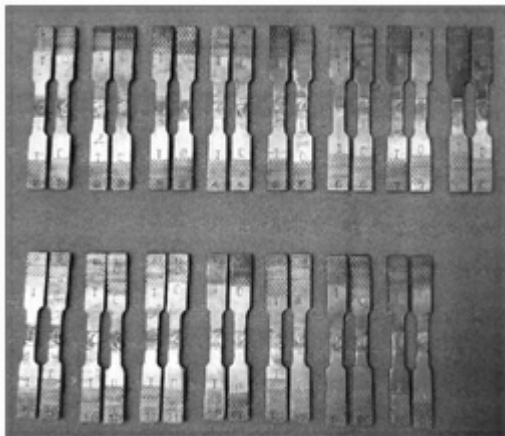


Fig. 4 Tensile test specimens

شکل 4 نمونه‌های تست کشش

المان انتخابی از نوع DC3D8 انتخاب شد که المانی مخصوص انتقال حرارت بوده و دارای 8 گره می‌باشد، همچنین برای مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی، مدل سه بعدی با منبع حرارتی متحرک در نظر گرفته شد.

از سوی دیگر، برای اندازه‌گیری تجربی دما نیاز بر آن شد که تغییرهایی در فیکسچر صورت گیرد. بدین منظور و برای به حداقل رساندن خطا، از دو قطعه چوبی به عنوان عایق حرارت استفاده شد و ترموکوپل‌ها از داخل آن‌ها عبور کرده و بر روی نمونه قرار گرفتند. برای مقایسه نتایج نمودارهای دما برای هر قطعه، سعی بر آن شد که شرایط اندازه‌گیری یکسان باشد، لذا برای اندازه‌گیری دما نقطه‌هایی به فاصله 100 میلی‌متر از ابتدای خط جوش و دقیقاً کنار لبه ابزار (فاصله 15 میلی‌متری خط جوش) در نظر گرفته شد.

در ناحیه HAZ هیچگونه عملیات مکانیکی صورت نمی‌گیرد و هرچه حرارت ایجاد شده در حین فرایند بیشتر باشد، افت سختی و رشد دانه‌ها بیشتر خواهد بود، از سوی دیگر، در صورتیکه دمای ایجاد شده در حین جوشکاری پایین‌تر از حد بهینه باشد، عمل اختلاط ضعیف بوده و جوش ایجاد شده از استحکام کافی برخوردار نخواهد بود؛ بنابراین و با توجه به دمای ایجاد شده در حین فرایند، دستیابی به اتصالی مطلوب است که دارای اندازه دانه بهینه و اثر اختلاط بهینه باشد، به بیان دیگر با افزایش دمای فرایند، رشد دانه‌ها تأثیر منفی و بهبود اختلاط تأثیر مثبتی بر روی استحکام کششی اتصال دارند و استحکام کششی تحت تأثیر برهمکنش این دو پارامتر می‌باشد، بدین جهت و با توجه به تأثیر پارامترهای جوشکاری بر حرارت ایجاد شده در حین فرایند، میکروساختار ناحیه متأثر از حرارت در نمونه 8 و 12 که به ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین دمای جوشکاری بودند، به همراه نمونه بهینه که دارای بالاترین میزان استحکام کششی بود، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. به منظور بررسی ریزساختار ناحیه HAZ نمونه‌های 8، 12 و OPW به وسیله میکروسکوپ نوری، ابتدا آلومینیوم با محلول فلیک و مس با محلول پولشن، اچ شدند.

در پژوهش حاضر، آزمون 6XRD به منظور تعیین کردن حضور و یا عدم حضور فازهای اینترمتالیک، ترکیب و مقدار احتمالی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنالیز XRD با استفاده از دیفرکتومتر اشعه X انجام شد. روش انجام آزمون به این صورت بود که ابتدا دیفرکتوگرام نمونه با استفاده از

<sup>6</sup> X-Ray Diffraction

شکل 5 نشان دهنده نمودارهای بدست آمده برای استحکام کششی (به عنوان متغیر پاسخ)، براساس متغیرهای فرایند می‌باشد. نمودارهای سه بعدی از روی داده‌های جوشکاری بدست می‌آیند تا به تجسم فکری روابطی که ممکن است بین یک متغیر وابسته و دو متغیر مستقل وجود داشته باشد، کمک کنند. برای تفسیر این نمودارها ابتدا باید این نکته را مد نظر داشت که با افزایش سرعت دورانی ابزار و کاهش سرعت خطی، اصطکاک افزایش و در نهایت حرارت ورودی در جوش افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر آفست ابزار دمای آن سمت از قطعه که ابزار به آن نزدیکتر شده است بیشتر می‌شود. علت تغییر استحکام کششی با تغییر در سرعت دورانی، نرخ پیشروی و آفست پین را می‌توان به سه عامل مرتبط دانست:

1- حرارت ایجاد شده در حین فرایند، 2- ساختار متالورژیکی اتصالات و تشکیل ترکیبات اینترمتالیک و 3- اختلاط و جریان مواد.

در سرعت‌های دورانی پایین، حرارت ایجاد شده در حین فرایند پایین می‌باشد و جریان مناسبی از مواد را فراهم نمی‌کند، با افزایش سرعت دورانی و در نتیجه افزایش حرارت حاصل از عملیات جوشکاری، عملیات اختلاط و جریان مواد به صورت مناسب‌تری انجام می‌شود و با وجود تشکیل بیشتر ترکیبات بین فلزی، درشت دانه‌تر شدن اتصالات و گسترش منطقه HAZ در این حالت، تأثیر اختلاط و جریان مواد بر تأثیر سه عامل مذکور غلبه کرده و استحکام کششی تا یک حد ماکزیمم افزایش می‌یابد، با بیشتر شدن سرعت دورانی استحکام کششی کاهش می‌یابد، دلیل این کاهش، درشت دانگی نواحی جوش، افزایش عیوب و ضعف متالورژیکی و تشکیل ترکیبات اینترمتالیکی و غلبه کردن تأثیر این عوامل بر تأثیر اختلاط و جریان مواد در حین فرایند می‌باشد. تأثیر سرعت پیشروی عکس سرعت دورانی می‌باشد. بطوریکه با افزایش سرعت پیشروی دما فرایند کاهش می‌یابد و عملیات اختلاط ضعیف‌تر می‌شود، بدین ترتیب ترکیبات اینترمتالیک تشکیل شده نیز کمتر می‌شوند. بنابراین با افزایش سرعت پیشروی و با کاهش دمای فرایند، ابتدا استحکام کشش تا حد بهینه‌ای افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. با افزایش آفست پین استحکام کششی افزایش می‌یابد و به یک مقدار بهینه می‌رسد و دوباره کاهش می‌یابد. این مسأله به دلیل واکنش ناکافی بین توده و یا ذرات مس با زمینه آلومینیومی است.

آنالیز واریانس برای مطالعه تأثیر پارامترها بر تابع هدف به کار گرفته شده‌است، که در جدول 4، نتایج حاصل از آن مشاهده می‌شود. نتایج ANOVA نشان‌دهنده این است که پارامترهای فرایند بر روی استحکام کششی اتصال عواملی بسیار تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین قابل ذکر است که تأثیرات تعامل بین پارامترها بر روی استحکام کششی بزرگ نبوده است. حال به منظور تخمین استحکام بهینه، می‌توان تابع ریاضی بین ورودی‌ها و خروجی را به کمک روش سطح پاسخ به صورت زیر تخمین زد:

$$\text{Tensile Strength} = +121.72 + 0.027688 \times (\text{Rotation Speed}) - 0.225 \times (\text{Linear Speed}) - 20.75 \times (\text{Pin Offset})$$

جدول 3 نتایج تست کشش نمونه‌ها

نمونه	استحکام کششی (Mpa)	درصد ازدیاد طول نسبی (%)
1	125	5/8
2	95	4/8
3	110	5/6
4	128	6/1
5	106	5/7
6	130	6/3
7	102	4/7
8	137	5/8
9	139	6/0
10	109	5/2
11	114	4/3
12	80	4/2
13	123	4/7
14	120	5/5
15	104	5/6

جدول 4 میزان اثرگذاری هر متغیر بر روی متغیر خروجی بر اساس تحلیل واریانس

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P Value
Model	2748/50	3	916/17	11/29	0/0011
Rotation Speed	1300/50	1	1300/50	16/02	0/0021
Linear Speed	648/00	1	648/00	7/98	0/0165
Pin offset	800/00	1	800/00	9/86	0/0094
Residual	892/83	11	81/17	-	-
Lack of Fit	874/17	9	97/13	10/41	0/0407
Pure Error	18/67	2	9/33	-	-
Cor Total	3641/33	14	-	-	-

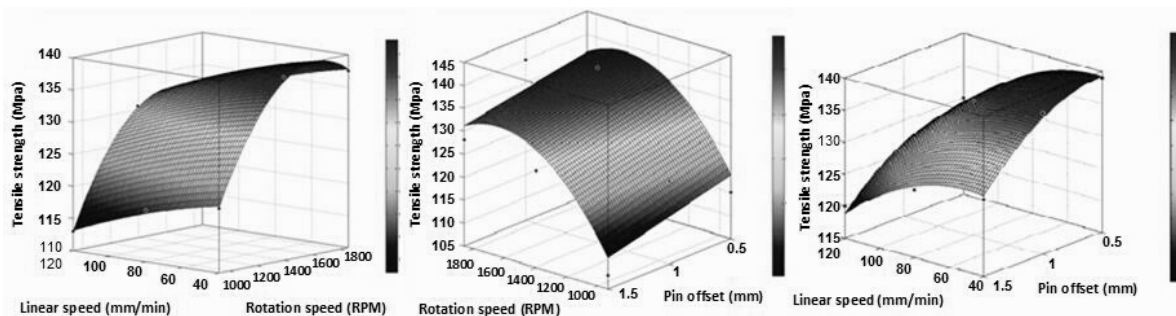


Fig 5. Surface drawn based on the ultimate strength than the variables of the process's parameters

شکل 5 رویه های رسم شده برحسب استحکام نهایی نسبت به پارامترهای متغیر فرایند

نشان دهنده این است که پارامتر سرعت دورانی بالاترین تأثیر را بر روی حرارت ایجاد شده توسط ابزار دارد. همان طور که در شکل های 6- ه و و، مشاهده می شود با تغییر آفست تغییر چندانی در حرارت ایجاد شده در حین فرایند ایجاد نمی شود، زیرا تغییر در آفست پین بیشتر بر روی جریان مواد تأثیر گذار است و تأثیر چندانی بر ماکزیمم دمای ایجاد شده در حین فرایند ندارد.

### 3-3- شبیه سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

برای محاسبه ی توزیع دمایی در قطعه کار، باید یک مدل حرارتی تعریف کرد. در جوشکاری، این مدل حرارتی از نوع گذرا است که در هر سه بعد مکان و همچنین در بعد زمان، متغیر است [9]. در اینجا فرض بر این است که کل گرمای ایجاد شده حاصل از اصطکاک شانه و قطعه کار است. لذا برای محاسبه توان خالص تولیدی، گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن ابزار درون مواد به شکل رابطه (1) قابل محاسبه است.

جدول 5 اطلاعات پیش بینی شده توسط روش سطح پاسخ

Table 5 All predicted data by response surface method

Parameter	Predicted Parameter	Experimental Parameter
Rotational Speed (rpm)	1670	1650
Pin Offset (mm)	0/54	0/54
Linear speed (mm/min)	50	50
Tensile strength (MPa)	145/5	144

جدول 6 نمونه های مورد بررسی در اندازه گیری تجربی دما

Table 6 The experimental measurement of temperature studied in samples

شماره نمونه	سرعت دورانی	سرعت پیشروی	آفست پین
1	1395	120	0/5
9	1395	40	0/5
7	1395	120	1/5
8	1860	40	1
11	930	40	1

شایان ذکر است با توجه به رویه های رسم شده، سرعت دورانی، آفست پین و سرعت حرکت خطی به ترتیب بیشترین تأثیر را روی استحکام کششی دارند. جدول 5 پارامترهای بهینه بدست آمده از طریق طراحی آزمایش ها به روش سطح پاسخ را نشان می دهد.

با انجام تست در شرایط بهینه بیشترین استحکام حاصله برابر 144 (Mpa) می باشد. با مقایسه این نتایج با نتیجه پیش بینی شده در جدول 5 مقدار درصد خطایی برابر 1/03 درصد حاصل می شود که این درصد ناچیز خطا، کارآمدی مدل ارزیابی شده توسط طراحی آزمایش را بیان می کند.

### 3-2- اندازه گیری دما بصورت تجربی و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر توزیع دما

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری بر روی حرارت ایجاد شده در حین فرایند، اندازه گیری دما با ثابت نگه داشتن دو متغیر و تغییر پارامتر سوم انجام شد، بدین ترتیب در نتیجه توزیع دمایی، می توان تأثیر هر کدام از پارامترها را جداگانه بررسی کرد. جدول 6 پارامترهای چند نمونه انتخابی برای اندازه گیری دما را بیان می کند.

شکل 6 نشان دهنده نتایج بدست آمده از اندازه گیری دما هستند. همان طور که در شکل های 6- الف و ب نشان داده شده است، ثابت نگه داشتن پارامترها و تغییر در سرعت خطی علاوه بر افزایش پیک دمایی، گسترش بازه زمانی را به دنبال دارد که این دلیلی بر افزایش ناحیه متأثر از حرارت به خاطر تحمل سیکل دما در زمان طولانی تر و به دنبال آن درشت ساختاری است. در شکل های 6- ج و د، با ثابت نگه داشتن پارامترهای سرعت پیشروی و آفست پین، سرعت دورانی مقادیر ماکزیمم و مینیمم خود را داراست. همان طور که مشاهده می شود، افزایش سرعت دورانی اختلاف پیک دمایی حدود 60 درجه سانتی گراد را موجب می شود؛ چنین نتیجه ای

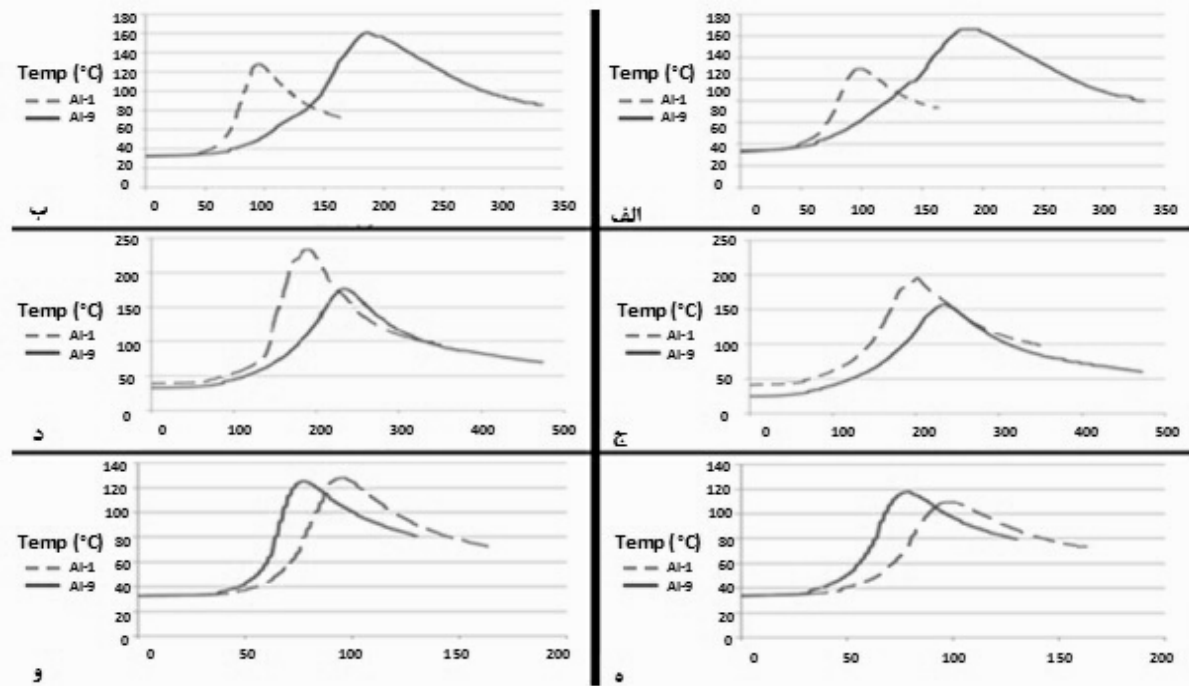


Table 6. Temperature changes According to process parameters a) Variable feed rate b, c) Variable rotational speed d, e) Offset variable pin

شکل 6 تغییرات دما بر حسب پارامترهای فرایند الف و ب) سرعت پیشروی متغیر، ج و د) سرعت دورانی متغیر ه و و) آفست پین متغیر

دهنده دقت بالای شبیه سازی انجام گرفته می باشد. بیشینه دمایی به دست آمده در تست عملی در قسمت آلومینیوم به 198 درجه سانتی گراد و در شبیه سازی به 189 درجه سانتی گراد رسید که میزان خطا در این مورد حدود 5 درصد می باشد. بیشینه دما در قسمت مس در تست عملی به 174 درجه سانتی گراد اندازه گیری شد و در شبیه سازی این مقدار برابر 160 درجه سانتی گراد بدست آمد که میزان خطای موجود برابر 8% می باشد.

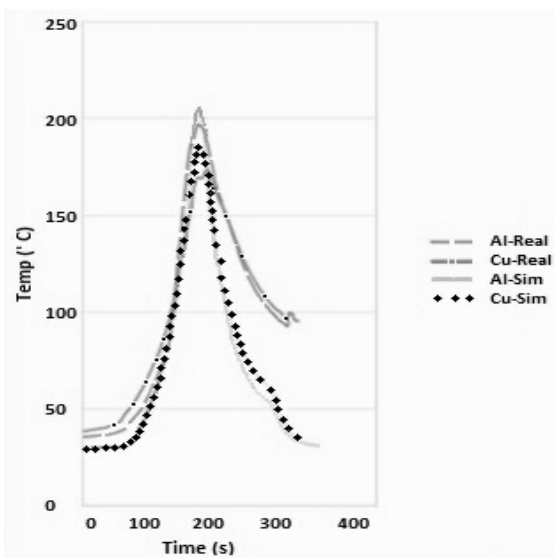


Fig 7. Level temperature history in optimized sample

شکل 7 تاریخچه دمایی در سطح نمونه بهینه

$$\int_{M_0}^{M_1} dm = \int_{R_0}^{R_1} \mu P(r) 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3} \mu \pi P (R_s^3 - R_p^3) \quad (1)$$

در رابطه (1)  $M$  گشتاور سطح مشترک،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $P$  فشار وارد بر قطعه حاصل از نیروی عمودی ابزار، شعاع پین و شعاع شانه است. با فرض اینکه تمام کار انجام شده در سطح مشترک ابزار-قطعه کار به گرما تبدیل شود، گرمای وارده میانگین از رابطه (2) به دست می آید:

$$Q_{in} = \int_{M_0}^{M_1} \omega dm = \int_{R_0}^{R_1} \omega 2\pi \mu P r^2 dr \quad (2)$$

$$Q_{in} = \frac{2}{3} \pi \omega \mu P (R_s^3 - R_p^3) \quad (3)$$

$\omega$  (rad/s) سرعت زاویه ای و  $Q_{in}$  توان خالص ورودی (نرخ منبع حرارتی) می باشد. از آنجا که  $\omega = \frac{2\pi N}{60}$  و  $N$  سرعت دورانی بر حسب rpm است، می توان روابط (4،5) را نوشت:

$$Q_{in} = \frac{4}{3} \pi \mu P N (R_s^3 - R_p^3) \quad (4)$$

$$R = \frac{R_p - R_s}{2} \quad (5)$$

حال برای محاسبه شار حرارتی وارد بر واحد سطح، از رابطه (6) استفاده می شود:

$$q_0 = \frac{3RQ_{in}}{2\pi R_s^3} \quad (6)$$

نتایج توزیع دمایی بدست آمده برای نمونه بهینه، از طریق اندازه گیری تجربی و شبیه سازی عددی، در شکل 7 ارائه شده است، همان طور که مشاهده می شود، مقایسه نتایج نشان-

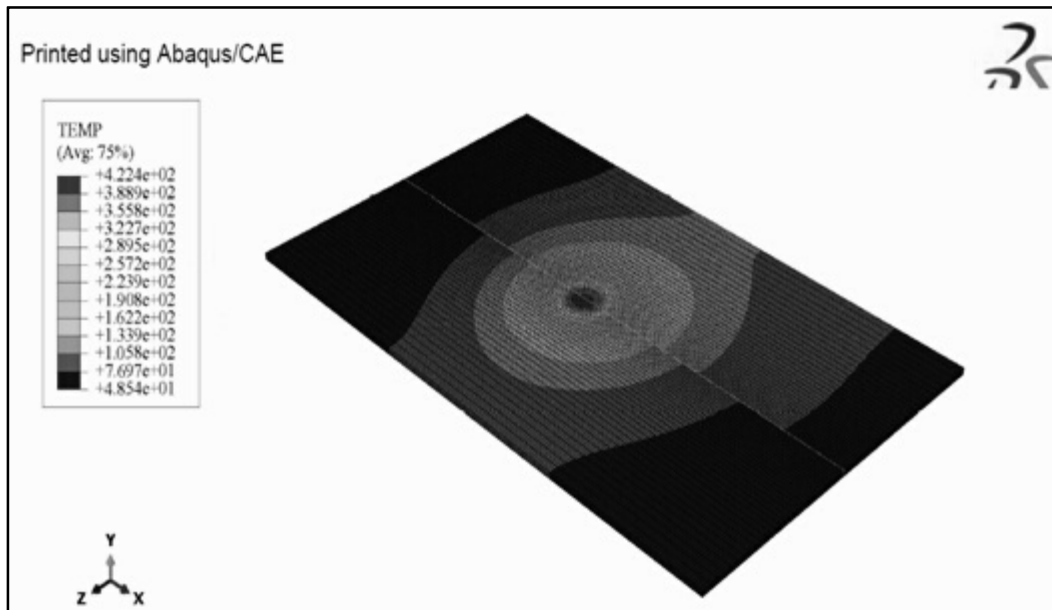


Fig 8. The resulting finite element temperature distribution in the optimal sample

شکل 8 توزیع دمایی حاصل از محاسبات المان محدود نمونه بهینه

دانه‌های بدست آمده برای این ناحیه با افزایش دمای فرایند افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، با افزایش حرارت ورودی، متوسط اندازه دانه‌ها برای جوش‌های مورد نظر افزایش می‌یابد، بطوریکه هرچه نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی بزرگتر باشد، اتصال بدست آمده درشت ساختارتر می‌باشد. از بین اتصالات مورد بررسی، نمونه شماره 8 به دلیل حرارت بالاتر ایجاد شده در حین فرایند، دارای اندازه دانه بزرگتری در ناحیه HAZ می‌باشد، ماکزیمم دمای بالاتر ایجاد شده باعث می‌شود که ناحیه HAZ سمت آلومینیوم نمونه‌ها بازه زمانی طولانی‌تری را تحت تأثیر دماهای بالا قرار گیرد و رشد بیشتری را در اندازه دانه‌ها تجربه کند.

### 3-5- آنالیز پراش پرتو X

شکل 10 نشان‌دهنده دیفرکتوگرام PDF مربوط به آنالیز نمونه شماره 12 است. همان‌گونه که مشخص است هیچ ترکیب اینترمتالیکی در قسمت مرکزی ناگت این نمونه مشاهده نمی‌شود، درحالی‌که سطح جوش حاوی پیک مربوط به ترکیب اینترمتالیکی  $CuAl_2$  می‌باشد.

این اتصال در نرخ پایین سرعت دورانی و نرخ بالای سرعت پیشروی تشکیل شد، از اینرو مقدار حرارت ورودی پایین‌تری را در مقایسه با جوش‌های دیگر داشت. با توجه به این مطلب که فازهای اینترمتالیکی به عنوان ترکیب‌های فعال شونده با حرارت و پدیده اختلاط شناخته می‌شوند، این ترکیبات در ناحیه اختلاط این نمونه به مقدار اندکی دیده شدند.

(دلیل این میزان خطا، عدم اندازه‌گیری دقیق دما به دلایل مختلفی می‌باشد که در بخش منابع خطا ذکر شده است). همچنین در شکل 8 کانتور دمایی حاصل از شبیه‌سازی حرارتی نمونه OPW ارائه شده است.

### 3-3-1- منابع خطا

در تحلیل‌های عددی معمولاً برای سریع‌تر انجام شدن محاسبه‌ها ساده‌سازی‌هایی صورت می‌گیرد. این ساده‌سازی‌ها عموماً منابع خطا هستند. در این مطالعه منابع خطای موجود عبارتند از:

- از مدل‌سازی ابزار خودداری شده است.
- رفتار مواد الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است.
- فشار وارد بر ابزار ثابت در نظر گرفته شده است.
- ضریب اصطکاک ثابت در نظر گرفته شده است.
- زاویه ابزار نسبت به سطح قطعه‌کار، عمود در نظر گرفته شده است.
- تغییرات شار حرارتی در سطح شانه یکنواخت فرض شده است.
- ثابت‌های موادی از مراجع برداشت شده‌اند.

### 3-4- متالوگرافی

شکل 10 ناحیه HAZ جوش‌های شماره 8، 12 و OPW را نشان می‌دهد. اندازه دانه‌های بدست آمده برای ناحیه HAZ سمت مس و آلومینیوم نمونه‌های مذکور، در جدول 7 مشخص شده است.

همان‌طور که در شکل 9 و جدول 7 مشخص شده است اندازه



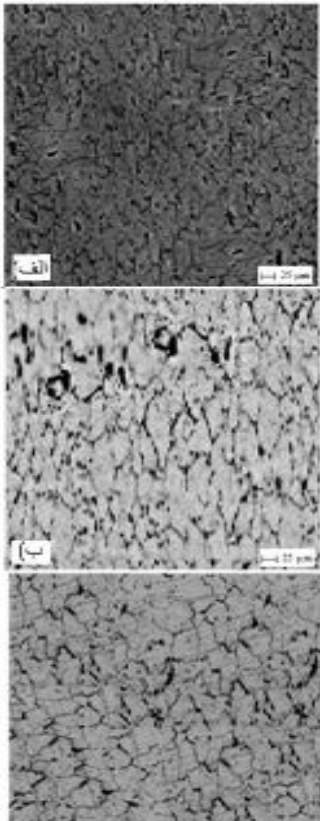


Fig 8. HAZ microstructure a) number 8 sample b) number 12 sample c) OPW sample

شکل 9 میکرو ساختار HAZ (الف) نمونه شماره 8، (ب) نمونه شماره 12، (ج) نمونه OPW

همان‌طور که در شکل 11 مشخص شده است، ناحیه اختلاط نمونه 8 حاوی پیک‌های بالاتری از فازهای اینترمتالیک است که بیانگر حجم بالاتر این ترکیب‌ها در ناحیه SZ این نمونه می‌باشد؛ در واقع شدت پیک حاصله در آنالیز XRD، نشان‌دهنده مقدار ترکیب مورد نظر در نقطه مورد بررسی است. با تغییر پارامترهای جوشکاری و افزایش دمای فرایند، شرایط مناسب‌تری برای تشکیل ترکیبات اینترمتالیک ایجاد می‌شود، این شرایط شیمیایی و ترمومکانیکی باعث ایجاد فازهای اینترمتالیکی بیشتر و یا تبدیل فازهای AL-Cu و CuAl<sub>2</sub> به فاز Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> می‌شوند. بنابراین اتصال شماره 8 در ناحیه ناگت، نشان‌دهنده مقدار پیک بالاتر ناشی از وجود فاز Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> نسبت به بقیه اتصال‌ها می‌باشد. بررسی آنالیز XRD نمونه OPW (شکل 12) بیانگر حضور فازهای اینترمتالیک CuAl<sub>2</sub> و Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> در ناحیه اختلاط این نمونه است.

جدول 7 اندازه دانه‌های بدست آمده برای ناحیه HAZ در نمونه‌های 12، 8 و OPW

Table 7 Grain size obtained for the HAZ In samples 12, 8 and OPW

نمونه	حدود اندازه دانه ها (μm)
12	34-37
8	55-58
OPW	43-47

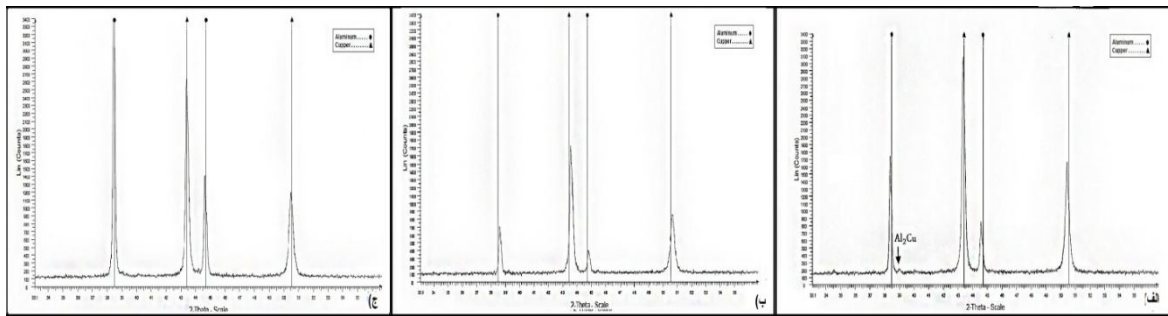


Fig 10. XRD analysis results for three different points of the number 12 mixing zone a) surface of weld b) center of weld c) center of joint

شکل 10 نتایج آنالیز XRD برای سه نقطه متفاوت از ناحیه اختلاط نمونه شماره 12 (الف) سطح جوش، (ب) و (ج) مرکز جوش

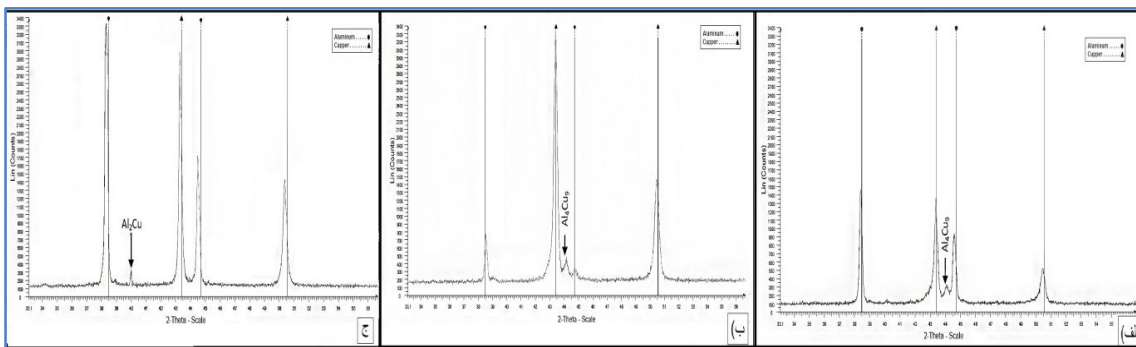


Fig 11. XRD analysis results for three different points of the number 12 mixing zone a) surface of weld b) center of weld c) center of joint

شکل 11 نتایج آنالیز XRD برای سه نقطه متفاوت از ناحیه اختلاط نمونه شماره 12 (الف) سطح جوش، (ب) و (ج) مرکز جوش

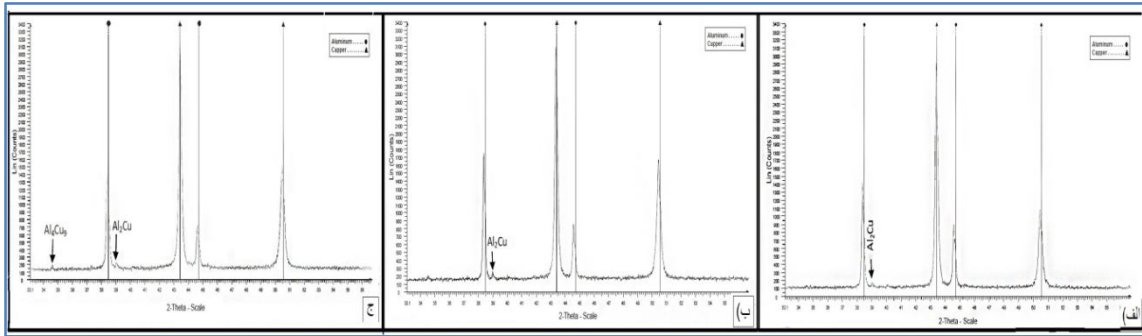


Fig 12. XRD analysis results for three different points of the number 12 mixing zone a) surface of weld b) center of weld

شکل 12 نتایج آنالیز XRD برای سه نقطه متفاوت از ناحیه اختلاط نمونه شماره 12 (الف) سطح جوش، (ب و ج) مرکز جوش

می‌شود، نمونه‌های 8 و OPW، به ترتیب بالاترین میزان رشد ناگهانی سختی در ناحیه اینترفیس را دارا هستند (بصورت پیک) که نشان دهنده بیشتر شدن حجم ترکیبات اینترمتالیک در این ناحیه است. به دلیل حرارت پایین ایجاد شده در حین جوشکاری نمونه شماره 12، پایین‌ترین حجم ترکیبات اینترمتالیک در این نمونه ایجاد می‌شود، با این وجود نمونه 12 دارای استحکام پایین‌تری نسبت به نمونه بهینه می‌باشد. این مشاهده به این دلیل است که عامل دیگر موثر بر روی استحکام کششی اثر اختلاط می‌باشد، در نمونه 12 به دلیل حرارت پایین ایجاد شده در حین فرایند، عملیات اختلاط ضعیف می‌باشد. بنابراین بار دیگر و با توجه به نتایج آزمون میکروسختی می‌توان به این نتیجه رسید که استحکام نمونه‌ها تابع میزان اختلاط ایجاد شده در حین فرایند، اندازه دانه‌ها و حجم و توزیع ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در حین جوشکاری می‌باشد.

ولی در این نمونه مقدار پیک مربوط به این فازها نسبت به نمونه شماره 8 کمتر است. همچنین در یکی از نقاط مربوط به مرکز ناحیه اختلاط نمونه بهینه، ترکیب اینترمتالیک Cu9Al4 مشاهده نشد؛ که به دلیل دماهای پایین‌تر ایجاد شده در حین جوشکاری این نمونه می‌باشد.

### 3-6- تست ریز سختی سنجی

شکل 13 نمودار بدست آمده از سختی سنجی نمونه‌های بهینه، 8 و 12 را نشان می‌دهد. با مقایسه نمونه‌های 12 و بهینه مشاهده می‌شود که در نمونه 12 که دارای کمترین حرارت تولیدی ناشی از جوشکاری می‌باشد، کمترین مقدار افزایش ناگهانی میکروسختی حاصل از تشکیل ترکیبات بین فلزی را نیز شاهد هستیم. با افزایش حرارت ورودی جوشکاری، حجم ترکیبات اینترمتالیک ناحیه اختلاط افزایش می‌یابد، این رشد بر روی نمودار میکروسختی نمونه‌ها مشخص است. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده

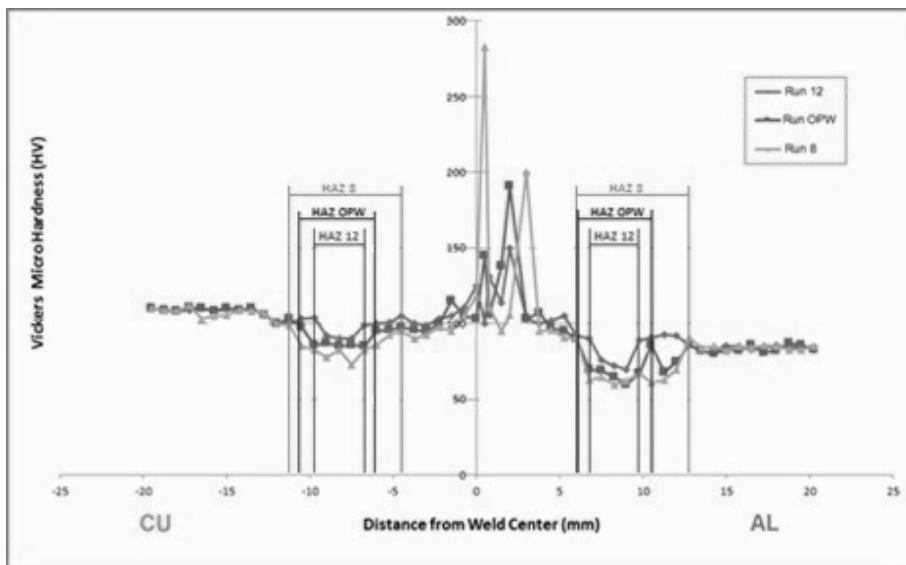


Fig 12. Hardness diagram perpendicular to the weld line

شکل 13 نمودار سختی در راستای عمود بر خط جوش

### 3-7- مقایسه نتایج بدست آمده با کارهای انجام شده قبلی

تأثیر پارامترهای فرایند بر روی استحکام کششی با نتایج بدست آمده توسط اسماعیلی و همکاران [3]، زئو و همکاران [5،4]، باتاکو و همکاران [6]، عبدالله‌زاده<sup>1</sup> و همکاران [10]، توکلی<sup>2</sup> و همکاران [11]، فتوحی<sup>3</sup> و همکاران [12]، قابل تایید است، نتیجه بدست آمده توسط هر هفت تحقیق ذکر شده و تحقیق حاضر، موید افزایش استحکام کششی با افزایش مقادیر پارامترهای سرعت چرخشی، سرعت دورانی و آفست ابزار، تا مقدار بهینه می‌باشد. این تغییرات را می‌توان مربوط به تغییر در حرارت ورودی با تغییر پارامترهای فرایندهای جوشکاری مرتبط دانست.

با افزایش سرعت دورانی، مواد در ناحیه اختلاط به طور همگن‌تری ترکیب می‌شوند و استحکام کششی در تناسب با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر سرعت دورانی حرارت ورودی بیشتر از حد بهینه می‌شود به طوری که در نواحی مختلف با ساختار درشت‌دانه، افت بیش از حد سختی، رشد ترکیبات اینترمتالیک ترد و همچنین گسترش منطقه متأثر از حرارت و در نتیجه با افت استحکام کششی مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی حرارت ورودی از یک مقدار مشخصی به یک مقدار بهینه‌ای کاهش می‌یابد و در طی آن ترکیب مواد و اختلاط آن‌ها به صورت مناسب‌تری انجام شده و میکروساختار نواحی مختلف به صورت ریزدانه‌تر درمی‌آیند، با افزایش بیشتر سرعت پیشروی حرارت ورودی به منظور ایجاد اختلاط به صورت مناسب کافی نمی‌باشد و استحکام کششی کاهش می‌یابد، با افزایش آفست ابزار نیز جریان مواد بهتر شده و عملیات اختلاط به صورت مناسب‌تری انجام می‌شود.

تغییر مقادیر سختی در پروفیل میکروسختی بدست آمده در تحقیق حاضر مشابه با تغییر مقادیر میکروسختی بدست آمده در کارهای زئو و همکاران [5]، باتاکو و همکاران [6]، سینگ<sup>4</sup> و همکاران [13]، تان<sup>5</sup> و همکاران [14] و لی<sup>6</sup> و همکاران [15] می‌باشد، بطوریکه در همه موارد ذکر شده پروفیل میکروسختی با روندی به شکل W برای نمونه‌های جوشکاری شده بدست آمد و نمودار میکروسختی بدست آمده نشان دهنده پیک‌هایی در منطقه اختلاط بود که در تحقیق

<sup>7</sup> Guerra

<sup>8</sup> Oyang

<sup>9</sup> Galvao

<sup>10</sup> Akinalbi

<sup>11</sup> Fenoel

<sup>1</sup> Abdollah-Zadeh

<sup>2</sup> Tavakoli

<sup>3</sup> Fotouhi

<sup>4</sup> Singh

<sup>5</sup> Tan

<sup>6</sup> Li

شده توسط ابزار داشت. تأثیر سرعت پیشروی عکس سرعت دورانی بود، بطوری که افزایش این پارامتر باعث کاهش ماکزیمم دمایی ایجاد شد. با تغییر آفست پین تغییر کمتری در ماکزیمم دمایی ایجاد شده در حین جوشکاری به وجود آمد، به این دلیل که آفست پین بیشتر بر روی جریان ماده تأثیرگذار است و نسبت به دو پارامتر دیگر، تأثیر کمتری بر روی حرارت ایجاد شده توسط ابزار دارد.

با افزایش کرنش و یا نرخ کرنش، متوسط اندازه دانه ناحیه HAZ سمت آلومینیوم اتصال کاهش یافته و با افزایش حرارت ورودی، افزایش می‌یابد. پس می‌توان گفت که با افزایش سرعت دورانی و آفست پین ابزار و کاهش سرعت پیشروی اندازه دانه‌ها در ناحیه HAZ افزایش می‌یابد.

در اتصال شماره 12، عیب پوست پیاز بصورت ناقص مشاهده گردید. به تدریج و با افزایش حرارت این عیب از بین رفت، زیرا در حالت خمیری مواد بهتر همزده می‌شوند و ساختار یکنواختی حاصل می‌شود.

تغییر پارامترهای جوشکاری و افزایش دمای فرایند باعث ایجاد فازهای بین فلزی بیشتر و یا تبدیل فازهای Cu-Al و CuAl<sub>2</sub> به فاز Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> می‌شوند. از سوی دیگر، در ناحیه ناگت اتصال شماره 12 که با پایین‌ترین حرارت ورودی جوشکاری شده است، فازهای CuAl<sub>2</sub> و Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> مشاهده نشدند. بررسی آنالیز XRD نمونه OPW بیانگر حضور فازهای بین فلزی CuAl<sub>2</sub> و Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> در ناحیه اختلاط این نمونه بود، ولی در این نمونه مقدار پیک مربوط به این فازها نسبت به نمونه شماره 8 کمتر بود.

نمودارهای میکروسختی بدست آمده از نمونه‌های جوشکاری شده دارای پیک‌هایی در ناحیه SZ بودند که به دلیل حضور ترکیب‌های بین فلزی در این ناحیه می‌باشد. با مقایسه نمونه‌های 12 و بهینه مشاهده شد که نمونه 12 کمترین مقدار افزایش ناگهانی میکروسختی حاصل از تشکیل ترکیبات بین فلزی را دارا بود. نمونه‌های 8 و OPW، به ترتیب بالاترین میزان رشد ناگهانی سختی در ناحیه سطح مشترک را دارا بودند.

با در نظر گرفتن 95 درصد حرارت منتقل شده به قطعه‌کار و با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل حرارتی فرایند و اندازه‌گیری تجربی دما در هر دو ناحیه اتصال، تطابق خوبی بین نتایج تحلیل FEM و تجربی مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان ماکزیمم دمای حاصل از فرایند جوشکاری را در ناحیه اختلاط پیش‌بینی کرد.

ابزار 2 درجه و در فاصله 13 میلی‌متری از ابزار، برابر با 240 درجه سانتی‌گراد بود. نتایج بدست آمده برای نمونه 12 در تحقیق حاضر (مشابه‌ترین نمونه به نمونه جوشکاری شده در تحقیق مذکور از لحاظ پارامترهای جوشکاری)، برابر با 197 درجه سانتی‌گراد بود، که این تفاوت به دلیل قطر کوچکتر شانه ابزار، فاصله دورتر اندازه‌گیری دما (فاصله 15 میلی‌متری از خط جوش)، زاویه بیشتر انحراف ابزار و بالاتر بودن سرعت پیشروی در تحقیق حاضر می‌باشد. مقایسه تفاوت ماکزیمم دمایی اندازه‌گیری شده برای دو سمت اتصال نشان‌دهنده اختلاف 32 درجه سانتی‌گرادی در پروژه انجام شده توسط باتاکو و همکاران [6] بود، درحالی‌که در تحقیق حاضر ماکزیمم دمای اندازه‌گیری شده در سمت آلومینیوم اتصال نمونه 11 به اندازه 20 درجه سانتی‌گراد بالاتر از سمت مس آن بود.

#### 4- نتیجه‌گیری

از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌توان به عنوان روشی مناسب برای جوشکاری غیرمتجانس آلیاژ آلومینیوم 1100 به مس خالص استفاده کرد.

در سرعت‌های دورانی پایین، حرارت ایجاد شده در حین فرایند پایین می‌باشد و جریان مناسبی از مواد را فراهم نمی‌کند. با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی، حرارت حاصل از عملیات جوشکاری افزایش می‌یابد. با افزایش حرارت ورودی اختلاط مواد مناسب‌تر می‌شود ولی با درشت‌دانگی، بزرگتر شدن منطقه متاثر از حرارت و گسترش ترکیب‌های بین فلزی روبرو هستیم که باعث کاهش استحکام می‌شود، نتیجه تعامل دو اثر مذکور باعث ایجاد یک حالت بهینه برای پارامترهای مورد استفاده برای جوشکاری می‌شود. بالاترین مقدار استحکام نهایی بدست آمده برای نمونه جوشکاری شده در حالت بهینه بود. مقدار استحکام کششی بدست آمده با پارامترای بهینه، خطای 1/03 درصدی با استحکام نهایی پیش‌بینی شده داشت؛ این خطای ناچیز بیانگر کارآمدی روش طراحی آزمایش ارائه شده بود.

نمونه‌ها در تست کشش، از ناحیه متأثر از حرارت ناحیه سمت آلومینیوم اتصال و از ناحیه اختلاط شکستند، که ناشی از رشد بیش از حد دانه‌ها ناحیه HAZ، اختلاط ضعیف و رشد ترکیب‌های بین فلزی در ناحیه SZ است.

با ثابت نگه داشتن پارامترهای سرعت پیشروی و آفست پین و با افزایش سرعت دورانی این نتیجه بدست آمد که پارامتر سرعت دورانی بالاترین تأثیر را بر روی حرارت ایجاد

5- مراجع

- Lap Joints, *Materials and Design* 43, pp. 80-88, 2013.
- [12] Y. Fotouhi, S. Rasaee, A. Askari, H. Bisadi, Effect of Transverse Speed of the Tool on Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Butt Friction Stir Welding of Al5083-Copper Sheets, *Engineering Solid Mechanics* 2, pp. 239-246, 2014.
- [13] Ratnesh Kumar Raj Singh, Rajesh Prasad, Sunil Pandey, Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Metals, *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering*, YMCA University of Science & Technology, Faridabad, Haryana, pp. 579-583, 2012.
- [14] C.W. Tan, Z.G. Jiang, L.Q. Li, Y.B. Chen, X.Y. Chen Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Dissimilar Al-Cu Joints Produced by Friction Stir Welding, *Materials and Design* 51, pp. 466-473, 2013.
- [15] LI Xia-wei, ZHANG Da-tong, QIU Cheng, Zhng Wen, Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22, pp. 1298-1306, 2012.
- [16] M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, Flow Patterns During Friction Stir Welding, *Materials Characterization*, pp. 95-101, 2003.
- [17] Jiahu Ouyang, Eswar Yarrapareddy, Radovan Kovacevic, Microstructural Evolution in the Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy (T6) to Copper, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 110-122, 2006.
- [18] I. Galvao, J. C. Oliveira, A. Loureiro, D. M. Rodrigues, Formation and Distribution of Brittle Structures in Friction Stir Welding of Aluminium and Copper: Influence of Process Parameters, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol 16, pp. 681-689, 2011.
- [19] Esther T. Akinlabi, Stephen A. Akinlabi, Effect of Heat Input on the Properties of Dissimilar Friction Stir Welds of Aluminium and Copper, *American Journal of Materials Science*, Vol. 2(5), pp. 147-152, 2012.
- [20] M.N. Avettand-Fenoel, R. Taillard, G. Ji, and D. Gordon, Multiscale Study of Interfacial Intermetallic Compounds in a Dissimilar Al 6082-T6/Cu Friction-Stir Weld, *Metallurgical and material Transactions*, Vol. 43 A, pp. 4655-4666, 2012.
- [1] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering journal*, pp. 1-78, 2005.
- [2] M.Sivashanmugam, S.Ravikumar, T.Kumar, V.Seshagiri Rao, D.Muruganandam, A Review on Friction Stir Welding for aluminium Alloys, *IEEE*, pp. 216-221, 2010.
- [3] A. Esmaeili, H.R. Zareie Rajani, M. Sharbati, M.K. Besharati Givi, M. Shamanian, The Role of Rotation Speed on Intermetallic Compounds Formation and Mechanical Behavior of Friction Stir Welded Brass/Aluminum 1050 Couple, *Intermetallics* 19, pp. 1711-1719, 2011.
- [4] P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao and Z.Y. Ma, Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of the Dissimilar Al-Cu Joints, *Materials Science and Engineering A* 528, pp. 4683-4689, 2011.
- [5] P. Xue, B. L. Xiao, D. Wang and Z. Y. Ma, Achieving High Property Friction Stir Welded Aluminium/Copper Lap Joint at Low Heat Input, *International Science and Technology of Welding and Joining* (16), pp. 657-661, 2011.
- [6] Andre D. L. Batako, Ahmed O. Al-Roubaiy and Saja M. Nabat, Experimental and Theoretical Analysis of Friction Stir Welding of Al-Cu Joints, *International Journal Adv Manuf Technol*, pp. 1631-1642, 2014.
- [7] Kush P. Mehta and Vishvesh J. Badheka, Influence of Tool Design and Process Parameters on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to AA6061-T651 Joints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015.
- [8] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, an American National Standard, ASTM-E8, [Metric].
- [9] P. Prasanna, B. Subba Rao, G. Krishna Mohana, Finite element modeling for maximum temperature in FSW and its validation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p.p 925-933, 2010.
- [10] A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, B. Sazgari, Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded aluminum/Copper Lap Joints, *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 535-538, 2011.
- [11] A. Tavakoli, H. Bisadi, M. Tour Sangsaraki, K. Tour Sangsaraki, The Influences of Rotational and Welding Speeds on Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al5083 and Commercially Pure Copper Sheets